

ガンマ線を使った 素粒子標準模型を超えた物理の探索

時安 敦史

東北大学先端量子ビーム科学研究センター (RARiS)

2024年9月11日

RARiS研究会「加速器を用いたガンマ線ビームの生成、基礎科学と産業分野への利用」

2024/09/10-11 於 東北大学先端量子ビーム科学研究センター

1. 標準模型を超える物理について
 - + 標準模型について
 - + 未発見粒子アクシオン
 - + 先行探索実験について

2. ガンマ線を用いたアクシオン探索実験の提案
 - + GeVガンマ線によるアクシオン生成
 - + ビームダンプ実験
 - + 真空複屈折実験

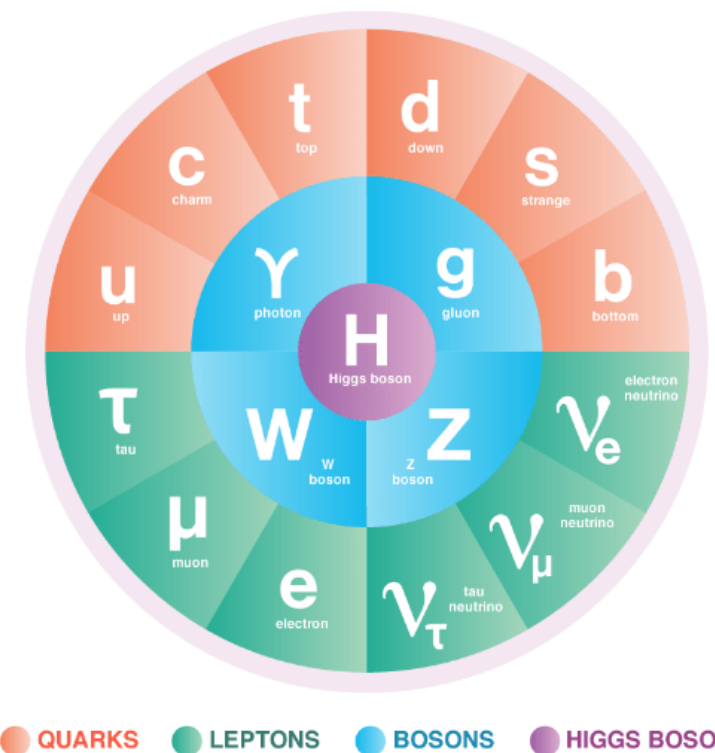
From Symmetry magazine

素粒子に働く4つの相互作用

- 100 - 強い相互作用 (核力の起源) → 量子色力学
- 1 - 電磁相互作用 (電磁気力) → ワインバーグ = サラム理論
- 10^{-3} - 弱い相互作用 (ベータ崩壊の起源) → ワインバーグ = サラム理論
- 10^{-38} - 重力相互作用 (万有引力) → 一般相対性理論

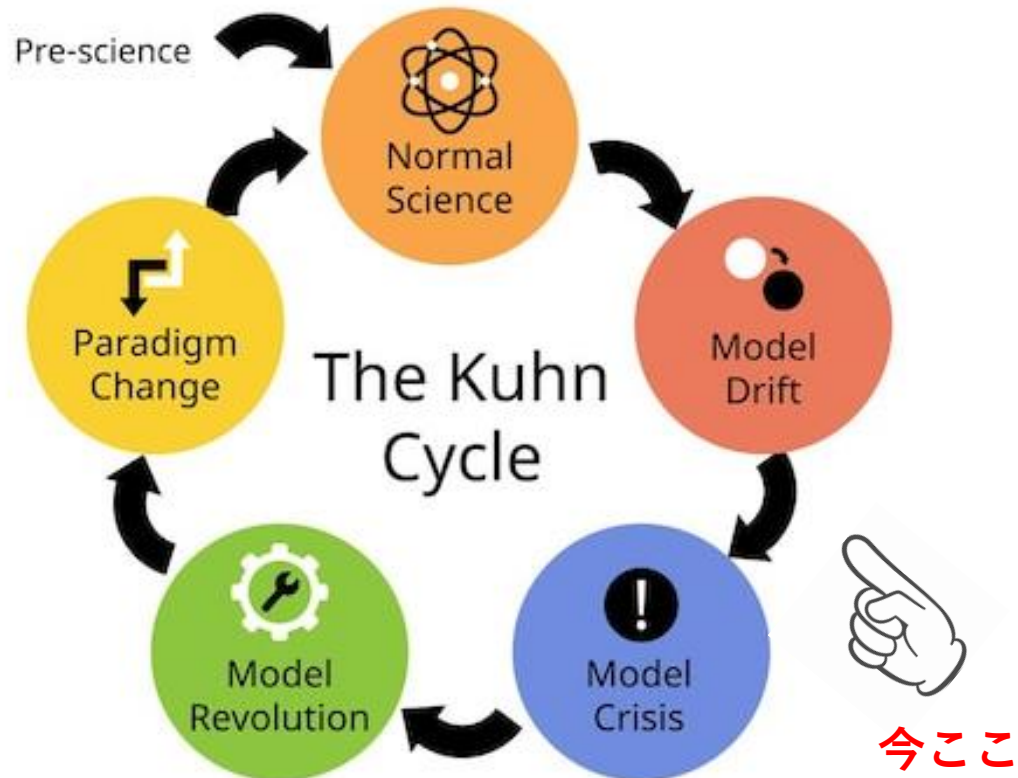
+ ヒッグス機構, CKM理論

標準模型



力の強さ

クォーク：スピン1/2。強い相互作用をする。
レプトン：スピン1/2。強い相互作用をしない。
ゲージボソン：スピン1。力を媒介。
ヒッグスボソン：スピン0。対称性の破れを媒介



2012年：ヒッグス粒子（1964年に提案された質量獲得メカニズムから予言された粒子）の発見。
→ 標準模型の（一応の）完成。

大統一理論：強い力、電磁気力、弱い力の統一。
候補：SUSY SU(5) 超対称性の導入。
→ LHC、KAMIOKANDE、MEG等で予言される事象が探索がされているが未発見。

超大統一理論：重力を含めた4つの力の統一。
超ひも理論、量子重力理論。
(地上実験では検証できないという声も。)

現状のまとめ：
標準模型を拡張させた理論から予測される事象を探索しているが未発見。
しかしながら、思いもよらぬところから、ほころびが見え始めている！

科学は連続的に発展するのではなく、既存モデルで説明できない現象が出てきたときに革命がおこる。（パラダイムシフト）
Thomas Kuhn, "The structure of Scientific Revolutions"

- μ 中間子g-2問題

μ 中間子の磁気モーメント測定値が理論計算と不一致。

- バリオジェネシス

物質が反物質より多い理由？

- ニュートリノの質量

ニュートリノの質量はゼロでないが軽すぎる（シーソーメカニズム）

- 陽子半径

μ 中間子原子で測定した陽子半径と、電子散乱で測定した陽子半径が異なる。

- 暗黒物質

標準模型に現れる粒子では、宇宙の質量の15%しか説明できていない。

- 強いCP問題

強い相互作用でCP対称性が破れていない。



→ **アクシオン**

アクシオンとは？

- 強いCP問題

☆強い相互作用を記述する量子色力学（QCD）のラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{QCD}} = \bar{Q}_i (i\gamma^\mu D_\mu - m_{ij}) Q_j - \frac{1}{4} G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} + \boxed{\frac{g^2\theta}{32\pi^2} G_{\mu\nu}^a \tilde{G}^{a\mu\nu}}$$

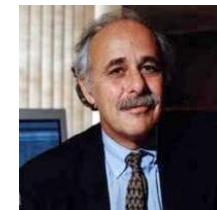
CP対称性を破る項

→ 強い相互作用でCP対称性が破れた現象は発見されていない！

→ 実測値： $|\theta| < 10^{-26}$ ←なぜこんなに小さい値なのか？ Ref) PRD 92 092003. a

- 解決法 (Pecci-Quinn 機構, 1977)

- 新しい対称性を仮定。
- 対称性が破れることにより、 $\theta = 0$ になるように調整される。
- 副産物として**アクシオン**という粒子が生まれる。



R. Peccei



H. Quinn

アクシオンの性質

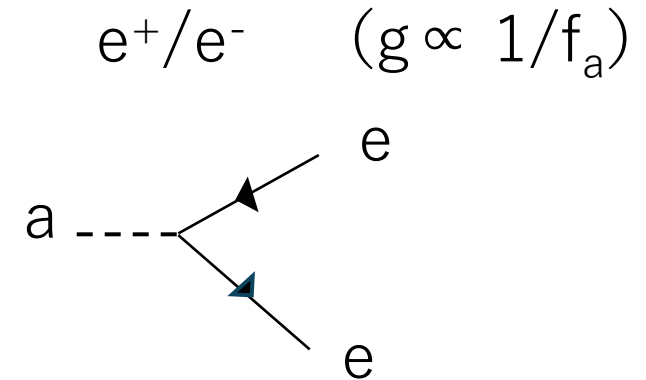
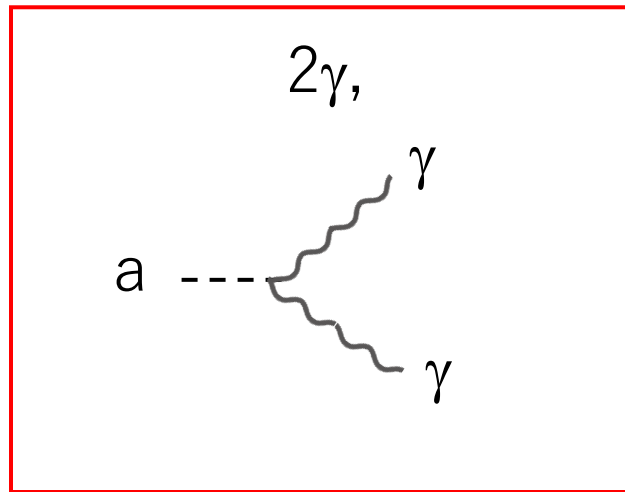
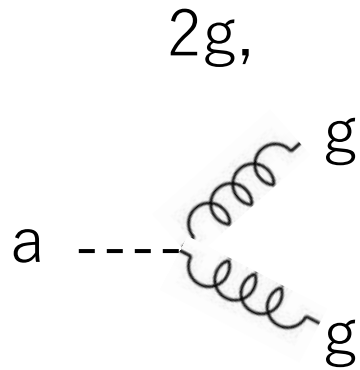
1. 質量

$$m_A = 5.70(7)\mu\text{eV} \left(\frac{10^{12}\text{GeV}}{f_A} \right)$$

f_A = アクシオンの崩壊定数

2. スピンパリティ $J^P = 0^-$

3. 結合



4. $f_a \gg f_{\text{weak}}$

→ 質量はとても小さい ($\ll \text{keV}$)。 $g \ll g_{\text{EW}}$ (“見えない”アクシオン)

→ 暗黒物質の候補

1. 宇宙空間に存在する暗黒物質アクシオンを検出。

メリット : 大量に存在するはず。 $\rho_{\text{DM}} = 0.3 \text{ GeV/cm}^3$, $m_a = O(10^{-6}) \text{ eV}$ だとすると、 10^{14} 個/cm³。

デメリット : アクシオンがどれくらいあるかわからない。 Annual modulation.

検出法 : 共振空洞

2. 人工的にアクシオンを生成して、その崩壊を検出。

メリット : 生成条件をコントロール可能。

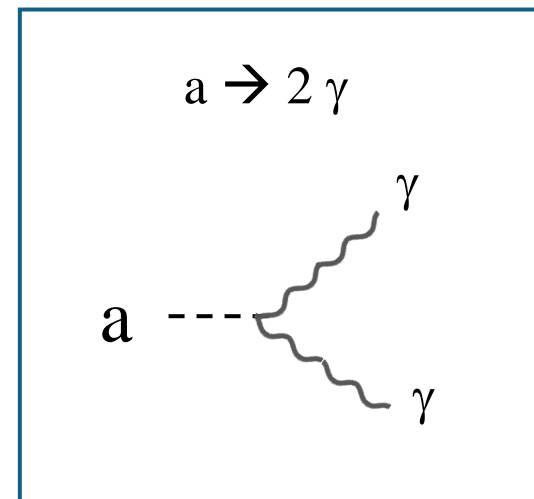
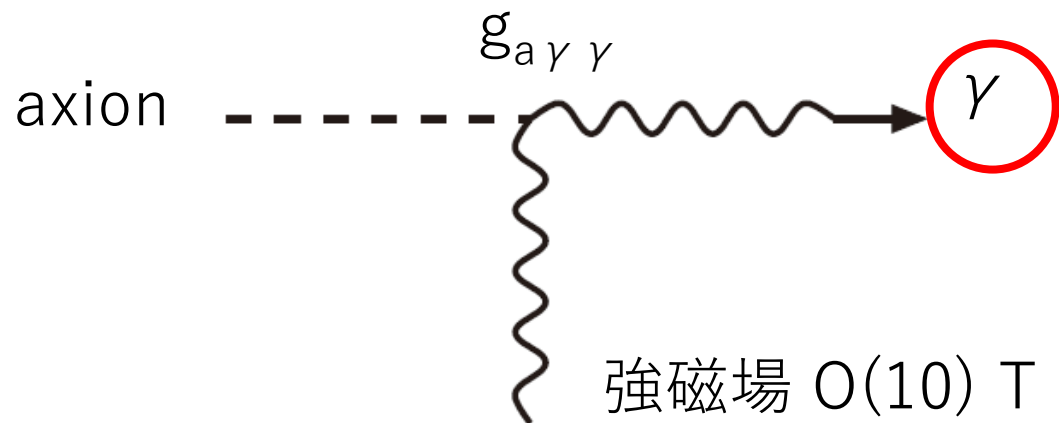
デメリット : 生成、崩壊検出効率は低くなる。

検出法 : Light Shadowing through a wall (LSW)実験

共振空洞を用いた実験

9 / 25

1. プリマコフ効果でアクシオンを光子に転換

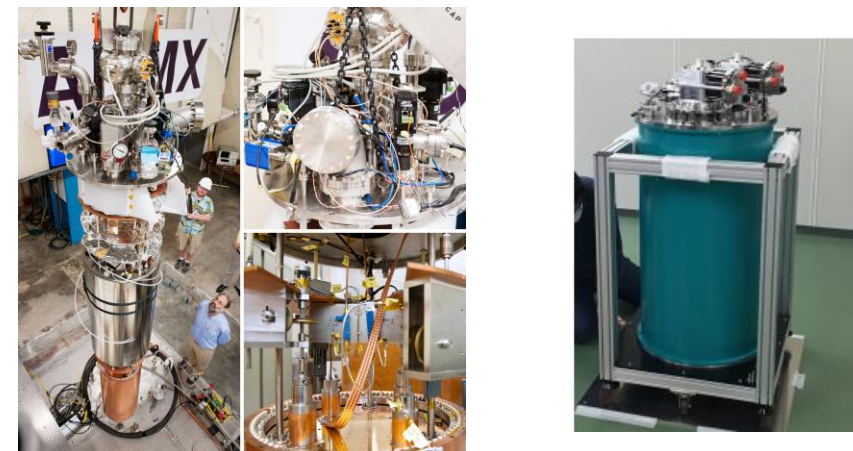


2. 共振空洞で光子を検出

$$m_a = 10 \mu\text{eV} \rightarrow 2.4 \text{ GHz}$$

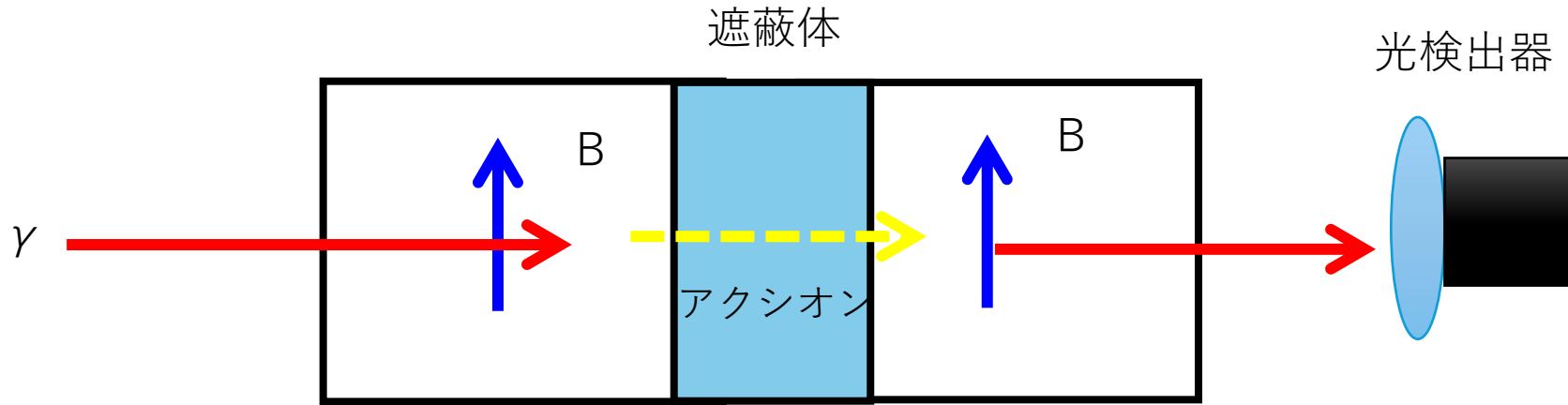
$$m_a = 100 \mu\text{eV} \rightarrow 24 \text{ GHz}$$

背景事象：黒体輻射
→ 希釈冷凍機で100 mK
程度まで冷却して実験。

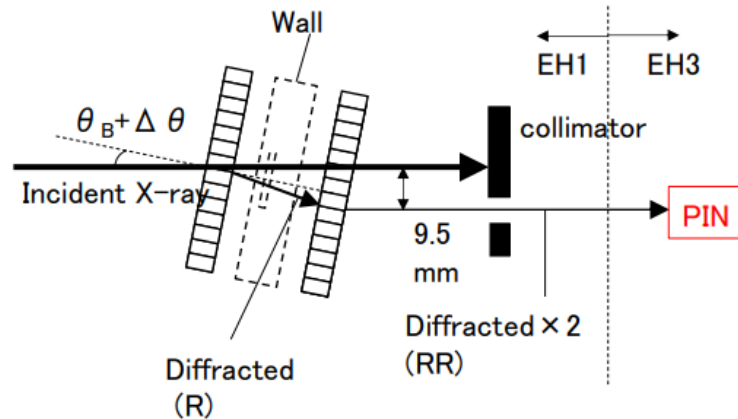
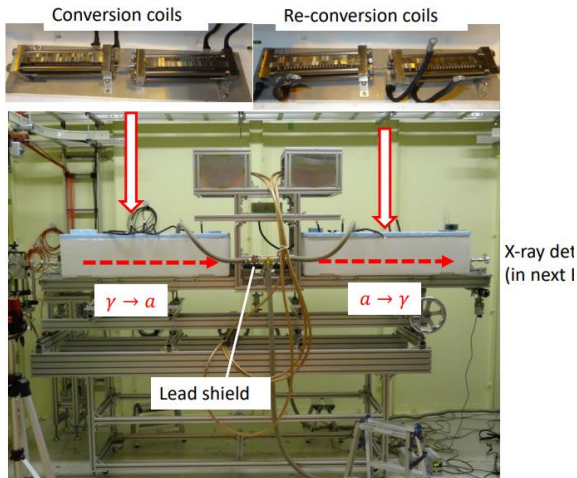


ADMX (ワシントン大) 探索実験@東北大

Light Shining Through a Wall (LSW)実験 10 / 25



Ex) SPring-8 BL19LXUにおける実験
(東京大学グループ)



X-ray (9 keV)

- 14.1 T pulse Magnet•

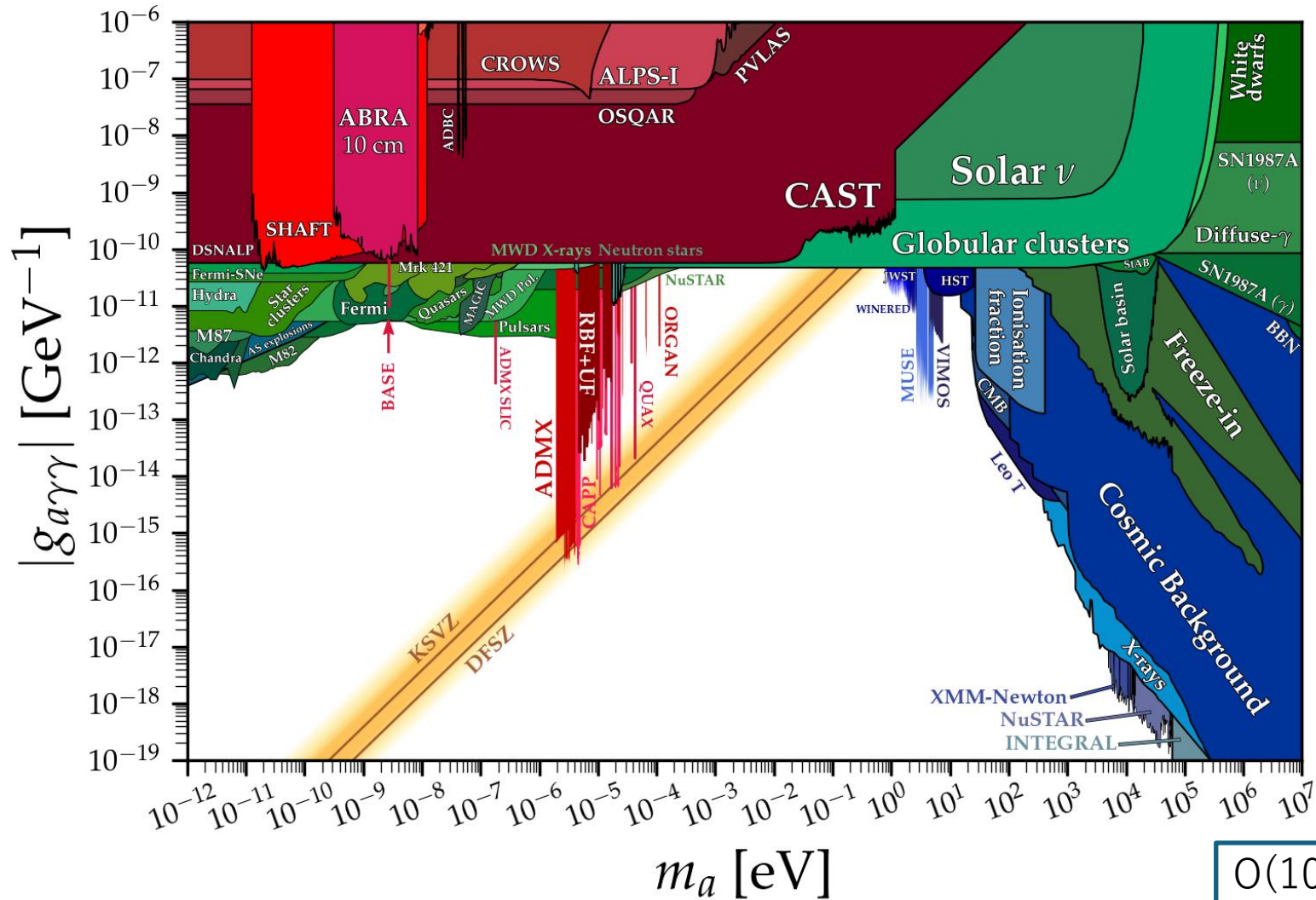
PRL 118(2017)071803

$g_{a\gamma\gamma} < 10^{-4}$ @ $ma \sim 0.1$ eV

- Si結晶 PLB 782(2018)523

$g_{a\gamma\gamma} < 10^{-3}$ @ $ma \sim O(10-1000)$ eV

アクシオンの探索状況



質量と光子結合定数の二次元プロット上で探索。

色がついているところが棄却領域。

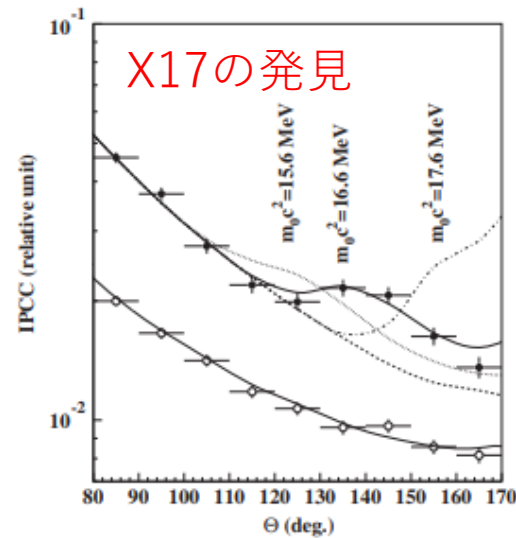
アクシオンの場合は、黄色い線まで探索を行う。

ALPsの場合は全領域。

O(10 - 100) MeVの領域は比較的未探索。
→ MeV-GeV ガンマビームを用いた探索実験。

- 制限を外したアクシオンに似た粒子 (Axion-Like Particles, ALPs)
→ 広いパラメータスペース、制限なし、出自を問わず(強いCP問題と関係なし)。

- Hidden Photon
- Milli-charged particle
- Chameleon
- WISPs (Weakly Interacting Slim Particles)
- Etc



Ref) PRL 116, 042501 (2016)



このような風潮に警告を鳴らす声もないわけではないが、実験屋としては新規実験を掲げて乗り込むチャンスであることも確か。

Maintz大 MESA実験は、ALPs探索をメインプロジェクトにあげている。

RARiS, SPring-8, SACLA, NewSUBARU, NanoTerasuでも、、、(以下、「アクシオン」)

目次

1. 標準模型を超える物理について

+ 標準模型について

+ 未発見粒子アクシオン

+ 先行探索実験について

2. ガンマ線を用いたアクシオン探索実験の提案

+ GeVガンマ線によるアクシオン生成

+ ビームダンプ実験

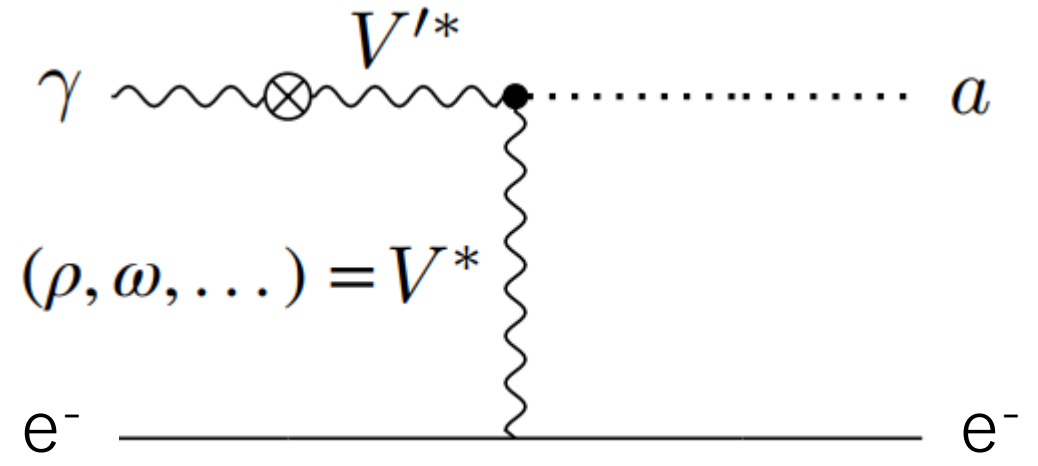
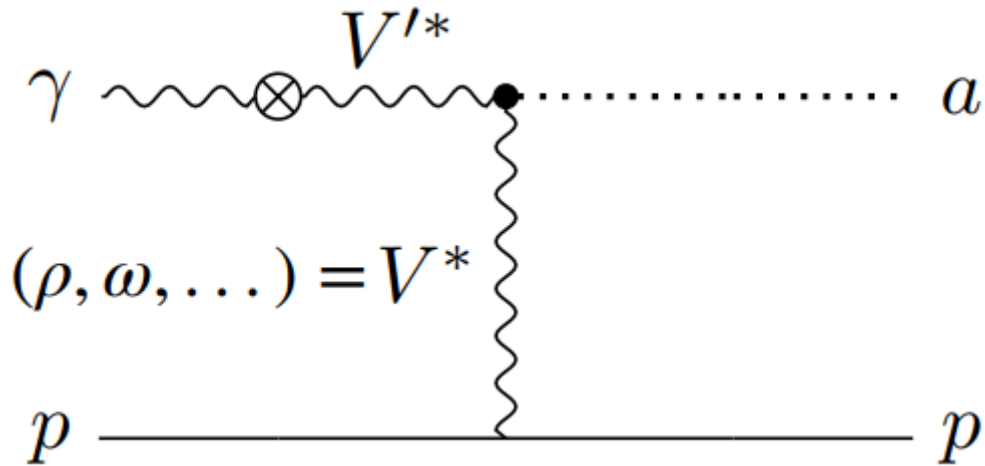
+ 真空複屈折測定

アイデア段階。ご指摘、コメント
いただけるとありがたいです。

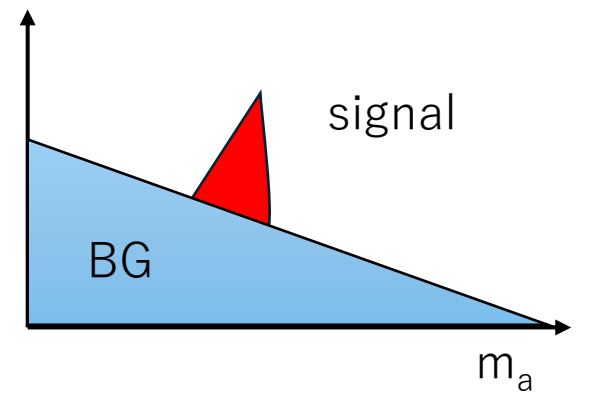
GeVガンマ線によるアクシオン生成

$$\gamma + p \rightarrow \text{axion} + p$$
$$E_\gamma = O(1) \text{ GeV } m_a = O(100) \text{ MeV}$$

$$\gamma + e^- \rightarrow \text{axion} + e^-$$
$$E_\gamma = O(1) \text{ GeV } m_a = O(10) \text{ MeV}$$



質量欠損分光により、ピーク探索。
ガンマエネルギーの測定, 散乱粒子 p, e^- を測定。



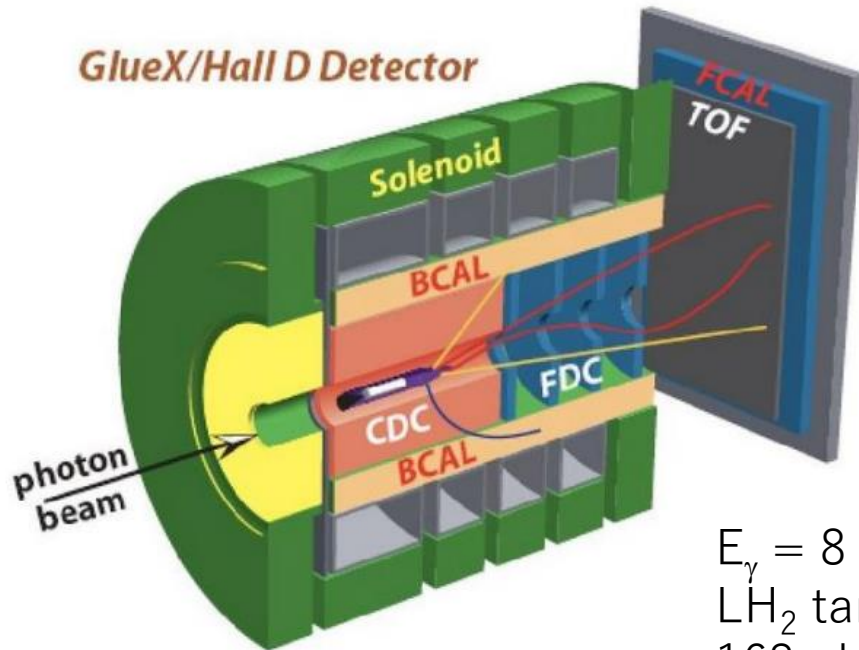
GlueX 実験 Ref.Phys. Rev. D105, 052007 (2022)

Bump structure search in the reactions:

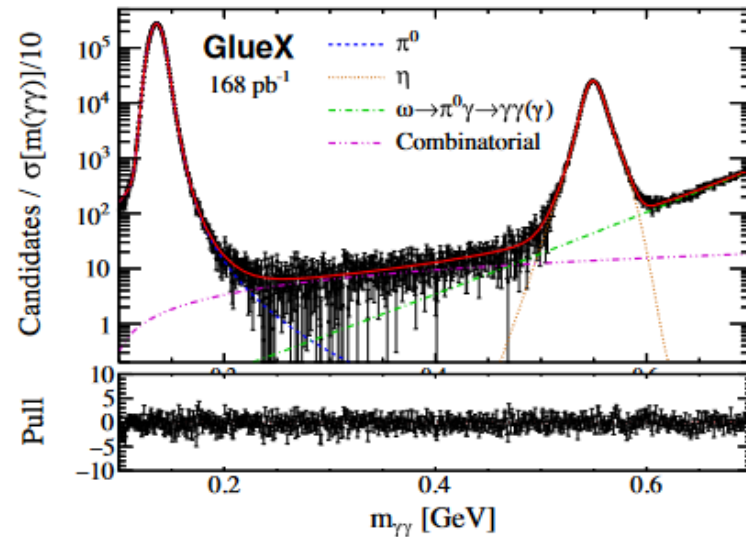
$$\gamma p \rightarrow p \gamma \gamma \quad \gamma p \rightarrow p \pi^+ \pi^- \pi^0$$

$$a \rightarrow \gamma \gamma \quad a \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

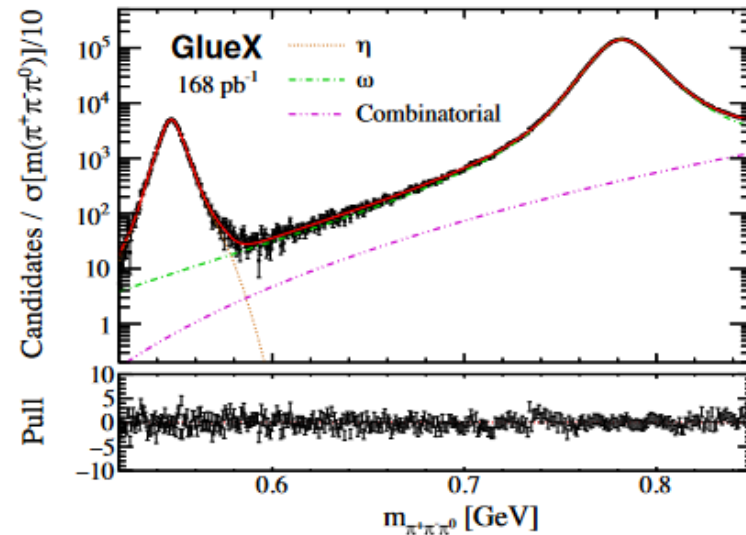
Accessible in the current FOREST setup.
(2020 dataset)



$E_\gamma = 8 - 9 \text{ GeV}$
LH₂ target
168 pb⁻¹ data



$180 < m_a < 480 \text{ MeV}$



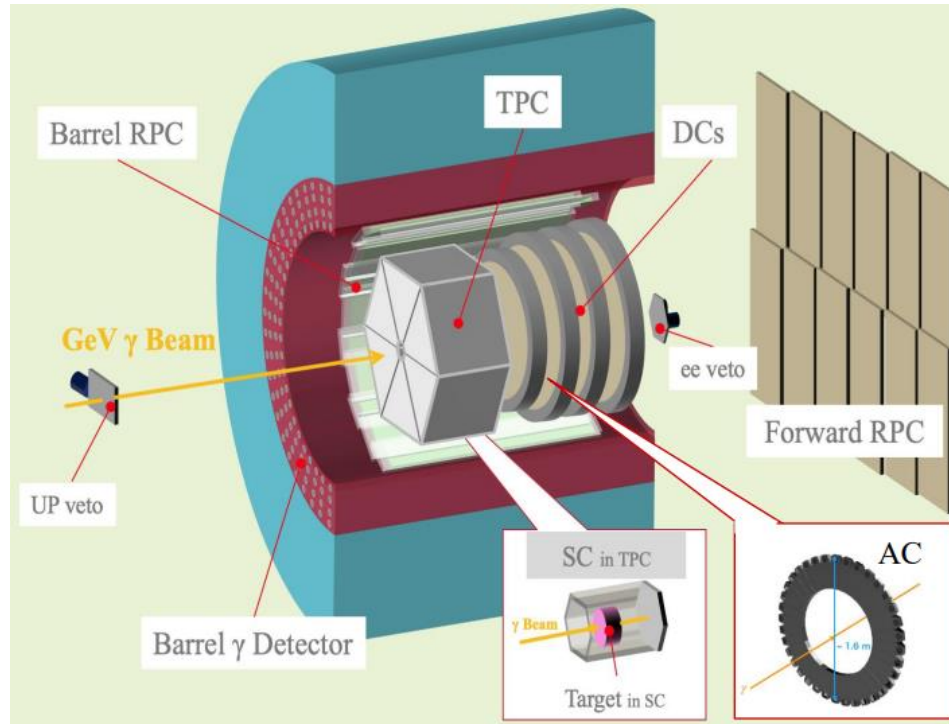
$600 < m_a < 720 \text{ MeV}$

U.L. (90% C.L.)

$$c_g / \Lambda \text{ [GeV}^{-1}\text{]}$$

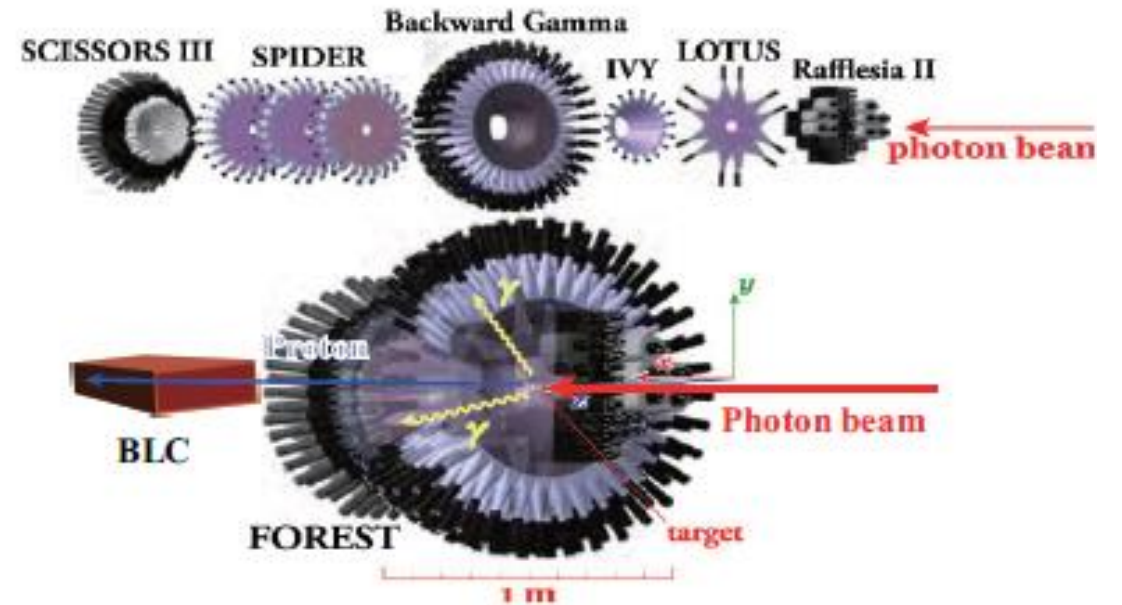
$$= \sim 10^{-3}$$

LEPS2solenoid 実験@BL31LEP



$E_\gamma = 1.4 - 2.9$ GeV (tagged), $\Delta E = 1$ MeV, LCS
Side+Fwd : magnetic spectrometer
Side : EM calorimeter

FOREST 実験@RARIs



$E_\gamma = 0.8 - 1.2$ GeV (tagged), $\Delta E = 1$ MeV, Brems.
Fwd : magnetic spectrometer < 2 deg
Side : EM calorimeter

両実験共、陽子標的データを取得済み。

目次

1. 標準模型を超える物理について


+ 標準模型について

+ 未発見粒子アクシオン

+ 先行探索実験について

2. ガンマ線を用いたアクシオン探索実験の提案

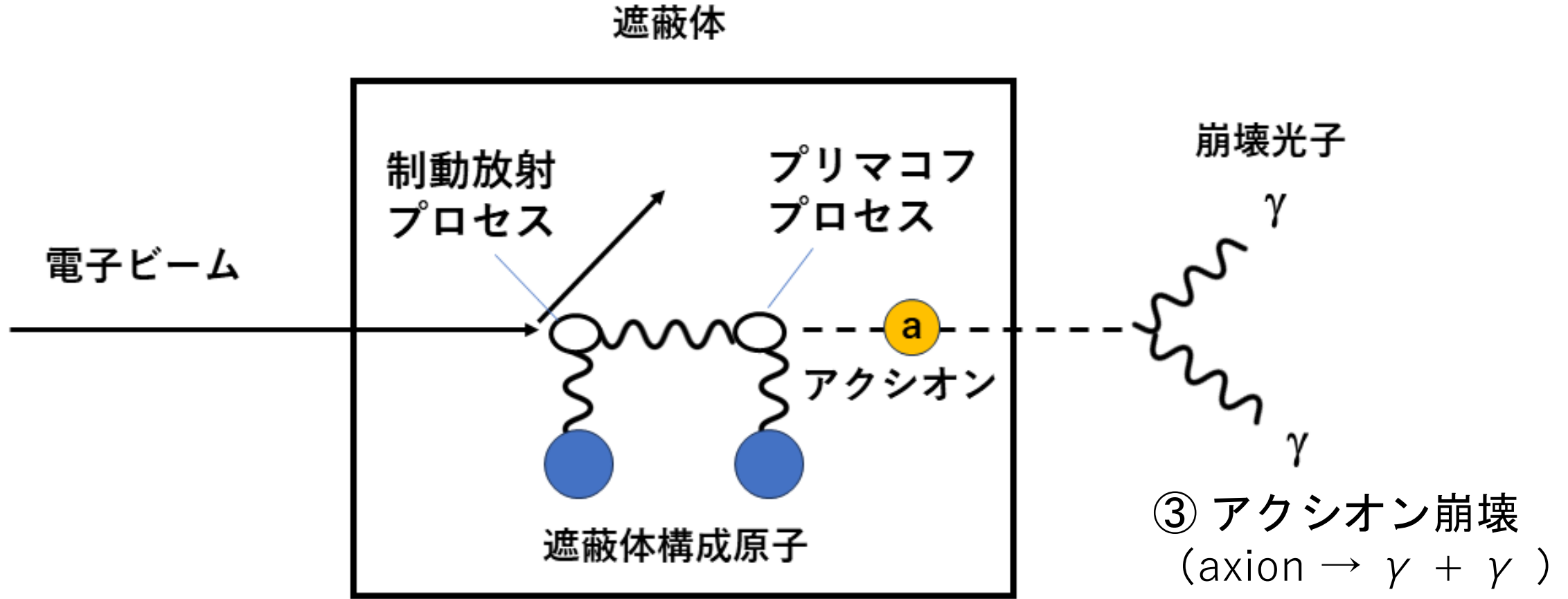
+ GeVガンマ線によるアクシオン生成

 + ビームダンプ実験

+ 真空複屈折測定

ビームダンプ実験 (1/3)

18 / 25



① 制動放射プロセス

($e^- + A \rightarrow \gamma + e^- + A$, Aは原子核)

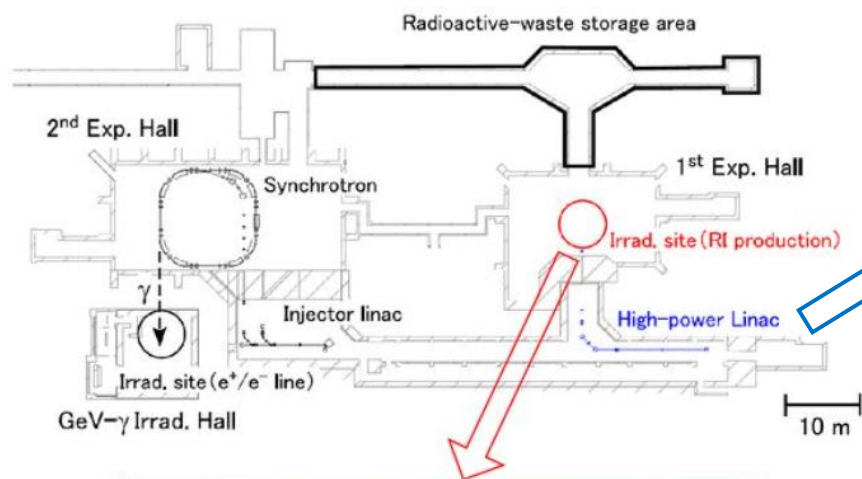
② プリマコフプロセス

($\gamma + \gamma \rightarrow \text{axion}$)

③ アクシオン崩壊
($\text{axion} \rightarrow \gamma + \gamma$)

ビームダンプ実験 (2/3)

19 / 25



*Constructed in 1967.

*Max power 15 kW

*Operation 120h/week

*E_e = 10 – 60 MeV (valuable)

*Macro pulse Peak current 120 mA

*Macro pulse duration 3.4 ms

*Modulator repetition 300Hz

*Average current 120μA, 3.6 mmφ

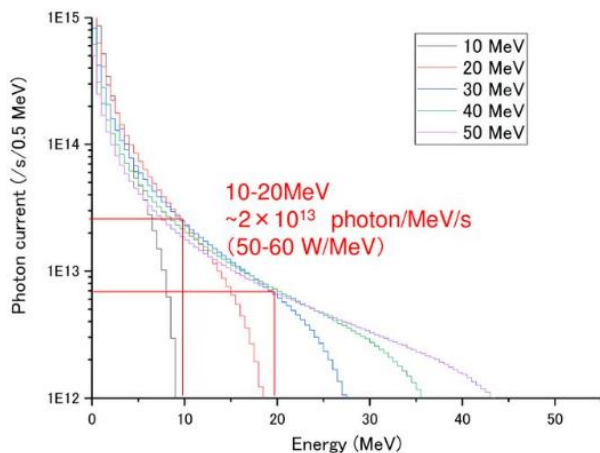
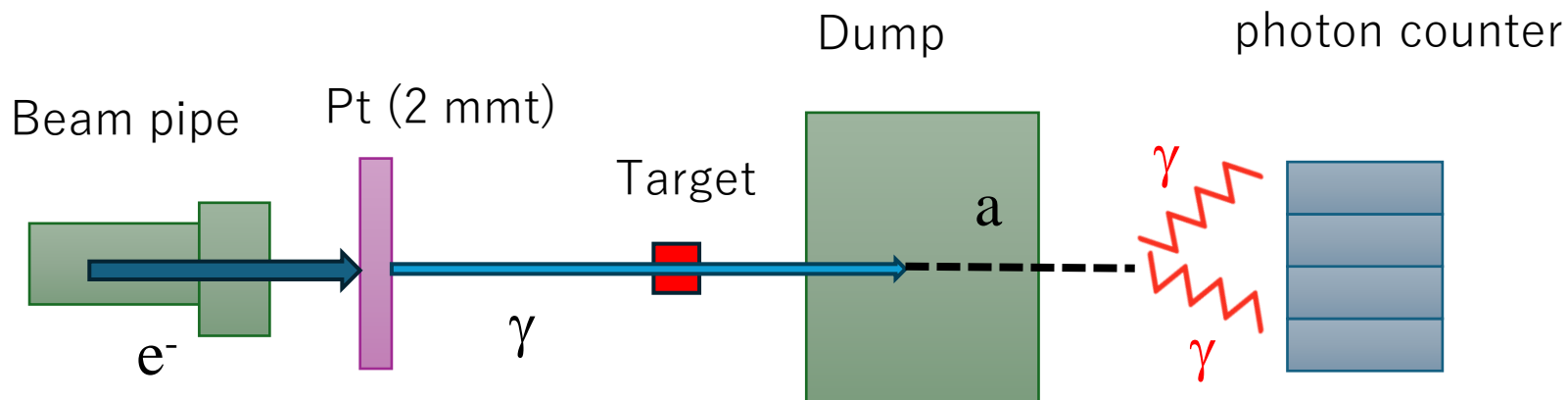
→ Used for **RI production**, and **electron scattering experiment** (ULQ2)



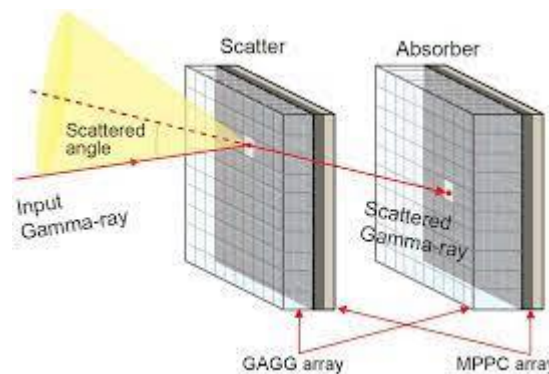
2017



ビームダンプ実験 (3/3)



MeV-Compton Camera
→ Vertex determination



* Expected yield (preliminary)

$$\sigma(\gamma N \rightarrow a N) \sim O(1) \text{ pb}$$

$$m_a = 10 \text{ MeV}$$

$$g_{a\gamma\gamma} = 10^{-7} \text{ GeV}^{-1}$$

100 μA , 300 hour
= 10^{18} electron on Pt

Pb 100 gcm^{-2}

Acceptance 10 %

$N_{\text{sig}} \sim$

RI生成のバイプロダクション
としての測定。

PHITSで背景事象を見積り中。
今年度中に測定開始！（できればいいなあ。。。）

目次

1. 標準模型を超える物理について

+ 標準模型について

+ 未発見粒子アクシオン

+ 先行探索実験について

2. ガンマ線を用いたアクシオン探索実験の提案

+ GeVガンマ線によるアクシオン生成

+ ビームダンプ実験

 + 真空複屈折測定

真空複屈折 (1/3)

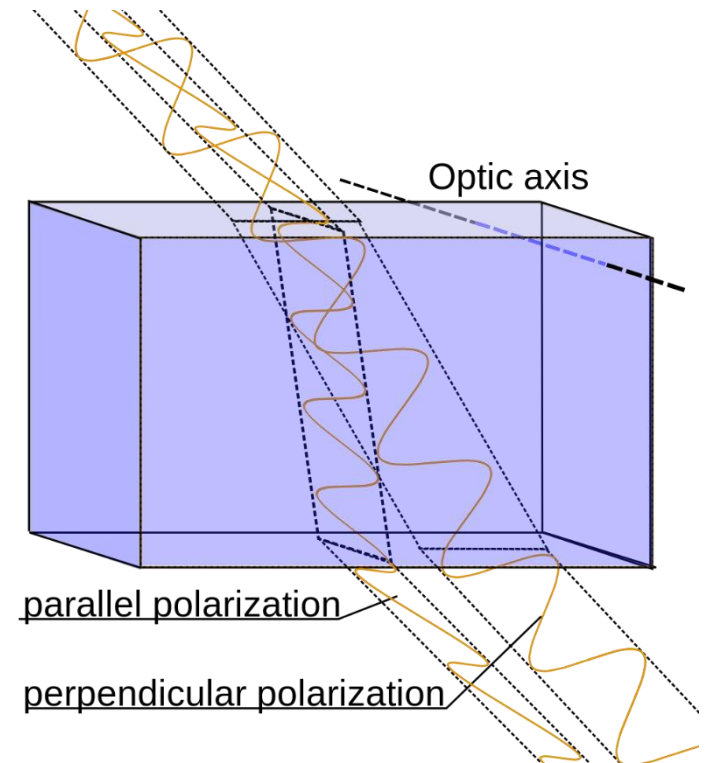
Birefringence (複屈折) :

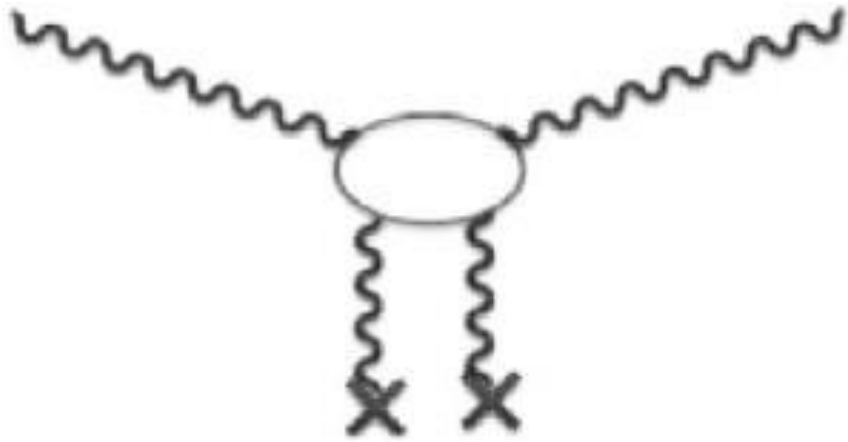
光の偏光と伝搬方向に屈折率依存するが

$$\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$$



Calcite





Leptonic e^+e^- vacuum birefringence

$$\begin{aligned}\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp} &= 3A_e B^2 \\ &= 4.0 \times 10^{-24} \times (B [\text{T}])^2 \\ &\equiv k_{\text{CM}} \times (B [\text{T}])^2,\end{aligned}$$

$O(10^{-24})$

Calculated in 1930s -1960s. **Not observed.**



e) Birefringence due to virtual spin zero bosons (e.g. axions)

$$\Delta n_{\text{ALPs}} = \frac{g_{\text{ALPs}}^2 B^2}{2m_{\text{ALPs}}^2} \left(1 - \frac{\sin 2x}{2x} \right)$$

PVLAS experiment Ref) Phys.Rep. 871(2020) 1

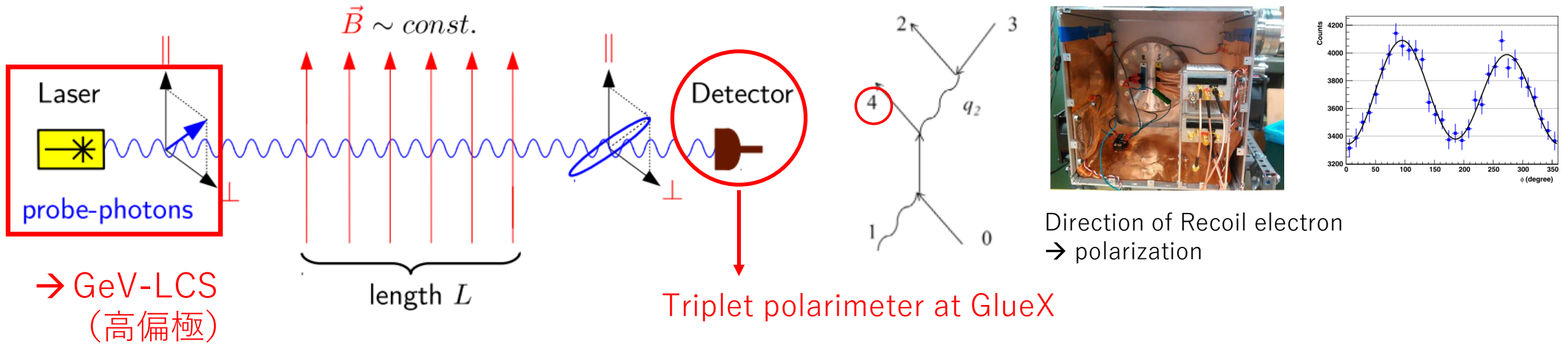
真空複屈折 (3/3)

- * Highly linearly polarized photon beam with GeV.
→ 10^9 shorter λ compared to visible light.
→ Cannot increase L by finesse.

$$\Phi = 2\pi \frac{L}{\lambda} \Delta n$$

* Pros and cons:

Short beam time, No Vacuum, low BG from gas. Hadron loop eff., higher order eff., Detector resolution



- 未発見粒子アクシオンを通じて、素粒子標準模型を超える物理を目指す。
- アクシオンは2つの光子に結合する性質を持っており、ガンマ線を用いて人工的に生成することが可能。
- ガンマ線のエネルギー、標的を変更することによって様々な質量領域において、探索実験が行える。
- GeVガンマ線による直接生成、ビームダンプ実験、真空複屈折を通じた測定について実験計画を紹介した。
- SPring-8, RARiSその他の施設において、探索実験ことが期待される。